

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 08-148113

(43)Date of publication of application : 07.06.1996

(51)Int.Cl.

H01J 43/12  
H01L 31/107

(21)Application number : 06-290070

(71)Applicant : HAMAMATSU PHOTONICS KK

(22)Date of filing : 24.11.1994

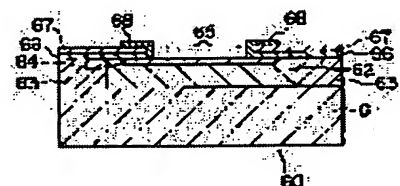
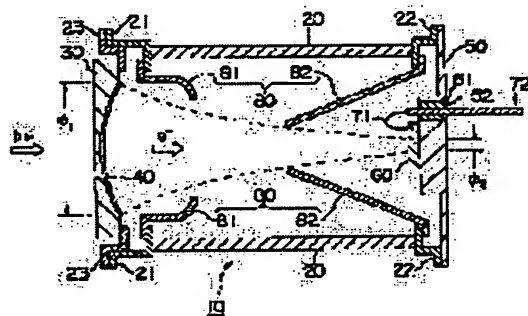
(72)Inventor : SUYAMA MOTOHIRO  
MURAMATSU MASA HARU  
OISHI MAKOTO  
ISHIKAWA YOSHITAKA  
YAMAMOTO AKINAGA

## (54) PHOTOMULTIPLIER

### (57)Abstract:

**PURPOSE:** To largely improve energy resolution by disposing a carrier multiplication layer obtained by epitaxial growth and a breakdown voltage control layer of dopant concentration higher than the former on a semiconductor element opposite to a photocathode.

**CONSTITUTION:** A photocathode 40 for producing photoelectrons due to photons, a semiconductor element 66 for multiplying photoelectrons, opposite to it, and electron lenses 80 converging photoelectrons are disposed in a high-vacuum vessel comprising an enclosure 20, a light incident window 30 and a stem 50. In a photomultiplier tube 10, as above, a carrier multiplication layer 62 with dopant obtained by epitaxial growth being uniformly distributed is disposed on a semiconductor substrate 61 of a semiconductor element 60. A breakdown voltage control layer 64 of dopant concentration higher than the former is disposed on the layer. A photoelectron receiving portions 65 is partly exposed by means of an insulating layer 67 and an ohmic electrode layer 68. Accordingly, uniformity in avalanche multiplication gain for photoelectrons is attached and energy resolution is largely raised, so that high sensitive and quantitative measurement of-faint light becomes possible.



---

**LEGAL STATUS**

[Date of request for examination] 30.07.2001

[Date of sending the examiner's decision of rejection] 26.11.2003

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

\* NOTICES \*

JPO and NCIPi are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.\*\*\*\* shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

---

CLAIMS

---

[Claim(s)]

[Claim 1] The photoelectric cathode which emits into a vacuum the envelope which holds the interior to a high vacuum, and the photoelectron which it was formed in the vacuum side of the entrance window of this envelope, and was excited by incident light, It counters with this photoelectric cathode, is installed in the interior of said envelope, and has the semiconductor device which detects said photoelectron emitted from the photoelectric cathode concerned. Said semiconductor device The semi-conductor substrate of the 1st conductivity type, and the carrier multiplication layer of the 2nd conductivity type formed by growing epitaxially on this semiconductor substrate, By being formed on the breakdown voltage control layer of the 2nd conductivity type which is formed on this carrier multiplication layer and has larger dopant concentration than the dopant concentration of the carrier multiplication layer concerned, and this breakdown voltage control layer The photomultiplier tube characterized by consisting of ohmic electrode layers in which the front face of the breakdown voltage control layer concerned is selectively exposed as the acceptance section of said photoelectron.

[Claim 2] It is the photomultiplier tube according to claim 1 which is installed between said photoelectric cathode and said semiconductor devices, is further equipped with the electron lens which converges said photoelectron emitted from the photoelectric cathode concerned, and is led to said acceptance section of the semiconductor device concerned, and is characterized by the aperture of said acceptance section being 10mm or less.

[Claim 3] The circumference of the front face exposed as said acceptance section of said breakdown voltage control layer is the photomultiplier tube according to claim 1 or 2 characterized by being covered with the insulating layer which consists of a nitride.

---

[Translation done.]

\* NOTICES \*

JPO and NCIPi are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. \*\*\*\* shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

---

DETAILED DESCRIPTION

---

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Industrial Application] the fluorescence which this invention is the photomultiplier tube which detects a feeble light which cannot be sensed with a naked eye by the sensibility which reaches a quantum limitation, and is generated more from the living body minute amount matter in a detail -- a single photoelectron -- it is related with the photomultiplier tube quantitatively measured by counting.

[0002]

[Description of the Prior Art] There are some which built in the avalanche photo-diode (APD; Avalanche Photo Diode) as a semiconductor device which amplifies and detects the photoelectron which there are various kinds of things in the conventional photomultiplier tube, for example, was emitted from photoelectric cathode. Such APD, especially APD of a bulk mold consist of various conductivity-type fields formed in the semi-conductor substrate by the diffusion method, ion-implantation, etc.

[0003] In addition, the advanced technology about such the photomultiplier tube is indicated by "United States Patent, No.5146296, Sep., 1992", "LASER FOCUS WORLD, pp.125-132, Nov., 1993", etc. at the detail.

[0004]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] However, in the above-mentioned conventional photomultiplier, the avalanche multiplication gain over a photoelectron is greatly dependent on the incidence location of the photoelectron in APD, and differs, and good uniformity cannot be obtained. Therefore, when two or more photoelectrons carry out incidence to the location where the acceptance sections of APD differ, there is a problem [ energy resolution ] of being inadequate, practical.

[0005] The electron lens which converges a photoelectron and is made to irradiate the acceptance section of APD as one of the approaches of solving this problem is installed. However, it is theoretically impossible to complete the photoelectron emitted from photoelectric cathode with this electron lens as one on the acceptance section of APD. Therefore, since incidence of each photoelectron is carried out to the location where the acceptance sections of APD differ, it has fully come to cancel the heterogeneity of the avalanche multiplication gain over a photoelectron too.

[0006] In addition, installation of such an electron lens is indicated by JP,5-54849,A at the detail, for example.

[0007] Moreover, building in a photodiode (PD; Photo Diode) is performed as a semiconductor device which amplifies and detects the photoelectron emitted from photoelectric cathode as one of the approaches of solving the above-mentioned problem. This PD is constituted as a location sensing element which arranged plurality superficially. However, since such PD does not have avalanche multiplication gain, total gain is comparatively small. Therefore, there is a problem that a single photoelectron is easily undetectable.

[0008] In addition, the advanced technology about such the photomultiplier tube "Nucl.Instr.and Meth., vol.A310 and pp.261-266, 1991""Nucl.Instr.and Meth., vol.A315, and pp.375-384, 1992""Nucl.Instr.and Meth. and vol. -- A330, pp.93-99, and 1993" -- it is indicated by "HYBRID PHOTOMULTIPLIER TUBES, Delft Electronische Producten", etc. at the detail.

[0009] Then, this invention is made in view of the above trouble, and aims at offering the photomultiplier tube which raises energy resolution substantially by attaining the uniformity of the avalanche multiplication gain over a photoelectron in the electron tube which contained the semiconductor device which has an avalanche multiplication layer.

[0010]

[Means for Solving the Problem] The photomultiplier tube of this invention was formed in the vacuum side of the entrance window of the envelope which holds the interior to a high vacuum in order to attain the above-mentioned object, and this envelope, it countered with the photoelectric cathode which emits into a vacuum the photoelectron excited by incident light, and this photoelectric cathode, was installed in the interior of an envelope, and is equipped with the semiconductor device which detects the photoelectron emitted from the photoelectric cathode concerned.

[0011] The carrier multiplication layer of the 2nd conductivity type formed by a semiconductor device growing epitaxially here on the semi-conductor substrate of the 1st conductivity type, and this semi-conductor substrate, By being formed on the breakdown voltage control layer of the 2nd conductivity type which is formed on this carrier multiplication layer and has larger dopant concentration than the dopant concentration of the carrier multiplication layer concerned, and this breakdown voltage control layer It is characterized by consisting of ohmic electrode layers in which the front face of the breakdown voltage control layer concerned is selectively exposed as the acceptance section of a photoelectron.

[0012] In addition, it is installed between photoelectric cathode and a semiconductor device, and has further the electron lens which converges the photoelectron emitted from the photoelectric cathode concerned, and is led to the acceptance section of the semiconductor device concerned, and the aperture of the acceptance section is good also considering being 10mm or less as a description.

[0013] Moreover, the circumference of the front face exposed as the acceptance section of a breakdown voltage control layer is good also considering being covered with the insulating layer which consists of a nitride as a description.

[0014]

[Function] In the photomultiplier tube of this invention, if a predetermined electrical potential difference is impressed from an external voltage source, inside an envelope, the electric field which go to photoelectric cathode from a semiconductor device will occur. Moreover, since a reverse bias electrical potential difference is impressed to the interior of a semiconductor device, the depletion layer (avalanche multiplication field) prolonged toward the breakdown voltage control layer from the plane of composition of a semi-conductor substrate and a carrier multiplication layer generates.

[0015] Here, if an external feeble light carries out incidence to the entrance window of an envelope as a photon, this photon will penetrate the interior of an entrance window, and will be absorbed by photoelectric cathode. Therefore, the electron located in the valence band of photoelectric cathode excites to a conduction band, and is emitted by negative electron affinity operation into a vacuum as a photoelectron. Thus, the photoelectron emitted from photoelectric cathode counters the electric field which go to photoelectric cathode from a semiconductor device, and carries out incidence to the acceptance section of a semiconductor device.

[0016] Whenever the photoelectron which carried out incidence to the acceptance section of a semiconductor device loses energy predetermined in the interior of a carrier multiplication layer, it generates the electronic-electron hole pair of a couple. Therefore, thousands of sets of electronic-electron hole pairs occur as a secondary carrier by the incidence of a single photoelectron. Since the gain over the photoelectron in this process, i.e., electron irradiation gain, is determined by the incidence energy of a photoelectron, it has good uniformity to the incidence location of the photoelectron in the acceptance section of a semiconductor device.

[0017] The drift of the secondary carrier which carried out multiplication immediately after this electron irradiation is countered and carried out to the electric field which go to a semi-conductor substrate or a breakdown voltage control layer from a carrier multiplication layer. One carrier of this secondary carrier arrives at the avalanche multiplication field generated inside the carrier multiplication layer. Thus, the drift was carried out, and since it repeats, the process, i.e., avalanche multiplication, in which a carrier collides with the molecule which constitutes a carrier multiplication layer, and ionization is caused, a dozens times as many electronic-electron hole pair as this is

generated further. While carried out avalanche multiplication, the drift of the carrier is countered and carried out to this electric field that go to a semi-conductor substrate or a breakdown voltage control layer from a carrier multiplication layer, and it reaches a semi-conductor substrate or a breakdown voltage control layer.

[0018] Here, the dopant distribution is dramatically controlled by homogeneity by growing epitaxially and forming a carrier multiplication layer on the semi-conductor substrate which has a different conductivity type from this. Therefore, the gain over the photoelectron in this process, i.e., avalanche multiplication gain, is reducing the dependence over the generation-of-carriers location in a carrier multiplication layer, and it has good uniformity.

[0019] The reverse current corresponding to the amount of multiplication of such a carrier is outputted to an external arithmetic unit from an ohmic electrode layer. Therefore, based on actuation of an external arithmetic unit, the number of the photon which carried out incidence to the photomultiplier tube is detected according to an individual one by one. therefore, the sensibility which reaches a quantum limitation in a feeble light which cannot be sensed with a naked eye -- a single photoelectron -- it is quantitatively measurable with counting.

[0020]

[Example] Hereafter, the configuration and operation of an example concerning the photomultiplier tube of this invention are explained to a detail with reference to drawing 1 thru/or drawing 5 . In addition, in explanation of a drawing, the same sign is given to the same element, and the overlapping explanation is omitted. Moreover, the rate of a proportion of a drawing is not necessarily in agreement with the thing of explanation.

[0021] As shown in 1st example drawing 1 , the photomultiplier tube 10 of this example makes the ends of the bell shape envelope 20 close airtightly by the entrance window 30 and the stem 50, respectively, holds the interior to the high vacuum of pressure 10<sup>-8</sup>Torr extent, and is constituted. As an electron lens 80, two focal electrodes 81 and 82 approach photoelectric cathode 30 and a stem 50, and are installed in the interior of this photomultiplier tube 10, respectively, and the semiconductor device 60 is installed on the stem 50.

[0022] An envelope 20 is a bell shape glass by-pass. The bell shape mounting material 21 and 22 bent by two steps is installed in the ends of this envelope 20, respectively. In addition, these mounting material 21 and 22 is formed with the covar metal, respectively.

[0023] An entrance window 30 is a disc-like glass face-plate, and has the flat surface and the concave surface, respectively as each front face by the side of atmospheric air and a vacuum. The bell shape mounting material 23 bent by two steps is installed in the vacuum side periphery section of this entrance window 30. The envelope 20 and the entrance window 30 are constituted by one by welding selectively each edge of two mounting material 21 and 23. In addition, the glass ingredient of an entrance window 30 has permeability to the wavelength of the light made into the measuring object.

[0024] A stem 50 is a disc-like metal face-plate, and has heights as an installation field of a semiconductor device 60 in the vacuum side. The envelope 20 and the stem 50 are constituted by one by welding selectively the vacuum side periphery section of this stem 50, and the edge of the mounting material 22. Moreover, the through hole 51 which inserts in the terminal rod 72 which a semiconductor device 60 mentions later is formed near the center section of the stem 50. In addition, this stem 50 is formed with the covar metal.

[0025] The thin film-like photoelectric cathode 40 is vapor-deposited and formed in the vacuum side front face of an entrance window 30. The predetermined electrical potential difference is impressed through the mounting material 23 from the external voltage source (not shown), for example, this photoelectric cathode 40 is [ about / potential ]. -It is held at 15kV. In addition, photoelectric cathode 40 is formed with alkali metal, for example, K, Na, Cs, Sb, etc. Moreover, in photoelectric cathode 40, incident light hnu is received, photo electric translation is carried out with predetermined quantum efficiency, and it is Photoelectron e. - Aperture phi 1 to generate It is about 16mm.

[0026] The focal electrode 81 of the shape of a bowl which one step was bent and was penetrated is selectively joined to the edge of the mounting material 21 by welding. This focal electrode 81 is installed with the position countered and converged on a stem 50. The same electrical potential difference as the applied voltage of photoelectric cathode 40 is impressed through the mounting

material 21 from an external voltage source (not shown), for example, the focal electrode 81 is [ about / potential ]. -It is held at 15kV. In addition, the focal electrode 81 is formed from stainless steel.

[0027] The focal electrode 82 of the shape of a hollow truncated cone which one step was bent and was penetrated is selectively joined to the edge of the mounting material 22 by welding. This focal electrode 82 is installed with the position which counters a stem 50 and is opened. the focal electrode 82 impresses a predetermined electrical potential difference through the mounting material 22 from an external voltage source (not shown) -- having -- for example, the potential 0 [ about ] -- it is held V. In addition, the focal electrode 82 is formed from stainless steel.

[0028] On the vacuum side heights of a stem 50, the acceptance section 65 which a semiconductor device 60 mentions later is made to counter photoelectric cathode 50, and it is installed. The electrode layer 66 which this semiconductor device 60 mentions later, and the metal terminal rod 72 which inserted in the through hole 51 of a stem 50 airtightly are electrically connected by carrying out bonding of the edge of the metal wire 71, respectively. the front-face side of a semiconductor device 60 impresses a predetermined electrical potential difference through the terminal rod 72 and a wire 71 from an external voltage source (not shown) -- having -- about [ for example, / potential ] -- it is held -145V. moreover, the rear-face side of a semiconductor device 60 impresses the same electrical potential difference as the applied voltage of an electron lens 81 through a stem 50 from an external voltage source (not shown) -- having -- for example, the potential 0 [ about ] -- it is held V. Thereby, the reverse bias electrical potential difference is impressed to the semiconductor device 60 as a whole.

[0029] In addition, the terminal rod 72 is connected to the external arithmetic unit (not shown) which processes the detecting signal outputted from the semiconductor device 60. Moreover, between a through hole 51 and the terminal rod 72, the cylinder-like insulating material 52 closes airtightly, and is installed in it. Furthermore, it sets to a semiconductor device 60 and is Photoelectron e. - The aperture  $\phi$  2 which is received and is effectively amplified with a predetermined multiplication factor is about 3mm.

[0030] As shown in drawing 2 , the square pole-like semiconductor device 60 is constituted as APD. This semiconductor device 60 is the photoelectron e which was emitted from photoelectric cathode 30 and it converged with the electron lens 80. - It is the semiconductor detector amplified and detected in the avalanche multiplication field which the acceptance section 65 mentioned later irradiates and is mentioned later.

[0031] On the center section of the plate-like semi-conductor substrate 61, the disc-like carrier multiplication layer 62 is formed. On the periphery of this semi-conductor substrate 61, the guard ring layer 63 in a circle has the same thickness as the carrier multiplication layer 62, and is formed. The disc-like breakdown voltage control layer 64 is formed in the surface central field of the carrier multiplication layer 62.

[0032] The semi-conductor substrate 61 is the 1st conductivity type, i.e., n+. It is the high concentration single crystal wafer formed by Si of a mold. This semi-conductor substrate 61 has about 500 micrometers of thickness, and P is doped by concentration abbreviation  $10^{19}\text{cm}^{-3}$  as an n mold dopant, and it has specific resistance about 0.01 ohm-cm.

[0033] The carrier multiplication layer 62 is a low concentration semi-conductor layer formed by growing epitaxially on the semi-conductor substrate 61 in Si of the 2nd conductivity type, i.e., p mold. This carrier multiplication layer 62 has about 10 micrometers of thickness, and B is doped by concentration abbreviation  $10^{14}\text{-}10^{16}\text{cm}^{-3}$  as a p mold dopant, and it has specific resistance about one to 100 ohm-cm. The dopant concentration of the carrier multiplication layer 62 is a value to which the depletion layer which spreads from a plane of composition with the semi-conductor substrate 61 reaches the breakdown voltage control layer 64, when the electrical potential difference close to breakdown voltage is impressed.

[0034] In addition, it is suitable for the thickness d to which epitaxial growth of the good crystallinity is held and carried out in this carrier multiplication layer 62 to set up so that it may be contained in the range of about 5 micrometers - about 50 micrometers. Since the heterogeneity of the dopant concentration of the direction of thickness becomes remarkable when larger than about 50 micrometers, Thickness d is Photoelectron e. - The uniformity of the receiving avalanche



multiplication gain will be degraded depending on a generation-of-carriers location. On the other hand, since the depletion layer in which Thickness  $d$  extends and spreads from the semi-conductor substrate 61 when smaller than about 5 micrometers becomes thin, it is Photoelectron e. - The receiving electron irradiation gain will be reduced.

[0035] Here, the reason for having set Thickness  $d$  as about 10 micrometers is the photoelectron e irradiated by acceleration energy abbreviation 15keV. - It is Photoelectron e to about 3 micrometers of maximum ranges, and about 3 micrometers of thickness of the avalanche multiplication field mentioned later. - It is because some allowances were taken into consideration, respectively in order to press down the receiving fluctuation of electron irradiation gain to minimum.

[0036] The guard ring layer 63 is a high concentration semi-conductor layer formed by carrying out thermal diffusion of the n mold dopant to the periphery of the carrier multiplication layer 62 as a dopant of the 1st conductivity type. This guard ring layer 63 has about 10 micrometers of the same thickness as the thickness of the carrier multiplication layer 62, and P is doped as an n mold dopant by the concentration abbreviation  $10^{19}\text{cm}^{-3}$  [ same ] as the concentration of the semi-conductor substrate 61.

[0037] The breakdown voltage control layer 64 is a high concentration semi-conductor layer formed by carrying out thermal diffusion of the p mold dopant to the surface central field of the carrier multiplication layer 62 as a dopant of the 2nd conductivity type. This breakdown voltage control layer 64 has about 1 micrometer of thickness, and B is doped as a p mold dopant by the concentration abbreviation  $10^{19}\text{cm}^{-3}$  [ same ] as the concentration of the semi-conductor substrate 61. The acceptance section 65 of a circle configuration counters photoelectric cathode 40, and is exposed to the surface center section of this breakdown voltage control layer 64.

[0038] In addition, it sets in this acceptance section 65, and is Photoelectron e. - Aperture  $\phi 2$  which is received and is amplified with a predetermined multiplication factor It is suitable to set up so that it may be contained in the range of about 10mm or less. It is aperture  $\phi 2$ . Since the heterogeneity of the dopant concentration of the direction of a front face becomes remarkable when larger than about 10mm, it is Photoelectron e. - The uniformity of the receiving avalanche multiplication gain will be degraded depending on a generation-of-carriers location. Moreover, since the capacity of an avalanche multiplication field becomes large, working speed will decrease.

[0039] On most on the surface periphery section of the breakdown voltage control layer 64 located in the periphery of the acceptance section 65, and the whole front face of the guard ring layer 63, two kinds of insulating layers 66 and 67 carry out a laminating one by one, and are formed. An insulating layer 66 is the insulating thin film formed with the oxide of Si. The thickness of this insulating layer 66 is about 200nm. An insulating layer 67 is the insulating thin film formed with the nitride of Si. The thickness of this insulating layer 67 is about 50nm.

[0040] In addition, in case the guard ring layer 63 and the breakdown voltage control layer 64 are formed, in order to hold the crystallinity of the carrier multiplication layer 62 good, an insulating layer 66 oxidizes the surface field of the carrier multiplication layer 62 beforehand, and is formed. Moreover, in case photoelectric cathode 40 is formed, in order not to degrade the semi-conductor property of the carrier multiplication layer 62, the guard ring layer 63, and the breakdown voltage control layer 64, an insulating layer 67 is made to deposit on an insulating layer 66, and is formed.

[0041] On the insulating layer 67, the ohmic electrode layer 68 in a circle is formed, and it is in contact with the surface periphery section of the breakdown voltage control layer 64 in accordance with the side attachment wall of insulating layers 66 and 67. This ohmic electrode layer 68 is the metal thin film formed with aluminum, and has good ohmic contact nature to the breakdown voltage control layer 64.

[0042] In addition, a predetermined electrical potential difference is impressed to the ohmic electrode layer 68 through the terminal rod 72 from an external voltage source (not shown) by the bonding of a wire 71, for example, it is held at the negative potential of -145V. Moreover, a predetermined electrical potential difference is impressed to the semi-conductor substrate 61 from an external voltage source (not shown) by installation on a stem 50, for example, it is held at the grand (GND) potential of 0V. Thereby, it is n+. The semi-conductor substrate 61 and p+ of a mold A depletion layer is generated as an avalanche multiplication field by between [ 62 ] the breakdown voltage control layers 64 of a mold (i.e., a carrier multiplication layer).



[0043] photoelectron e- which carried out incidence to the acceptance section 65 here electron irradiation gain until it arrives at an avalanche multiplication field -- about  $4 \times 10^3$  it is. Avalanche multiplication gain until these carriers pass through an avalanche multiplication field and reach the semi-conductor substrate 61 is about 30. Thereby, a semiconductor device 60 is Photoelectron e as a whole. - The gain of the secondary electron to receive is 105. Extent is reached.

[0044] In addition, APD of the super-abrupt junction mold approximated to APD of such a step junction mold is indicated by JP,50-54290,A at the detail, for example.

[0045] Next, the production process of the semiconductor device 60 in this example is explained.

[0046] the usual CVD (Chemical Vapor Deposition) as the 1st step -- law -- being based -- n+ On the whole surface of the semi-conductor substrate 61 which consists of a mold Si, epitaxial growth of the p mold Si is carried out, and the carrier multiplication layer 62 of p mold is formed. Next, based on the usual oxidizing [ thermally ] method, the insulating layer 66 which the surface field of the carrier multiplication layer 62 is oxidized, and consists of an oxide of Si is formed. Then, the carrier multiplication layer 62 located in the method of a circumference subordinate of an insulating layer 66 is made to diffuse P selectively as an n mold dopant based on the usual thermal diffusion method, and it is n+. The guard ring layer 63 of a mold is formed. Furthermore, the carrier multiplication layer 62 located in the center-section lower part of an insulating layer 66 is made to diffuse B selectively as a p mold dopant based on the usual thermal diffusion method, and it is p+. The breakdown voltage control layer 64 of a mold is formed.

[0047] As the 2nd step, based on the usual CVD method, the nitride of Si is made to deposit and an insulating layer 67 is formed on the whole surface of an insulating layer 66. Next, based on the usual photolithography technique, a mask layer in a circle is formed on the periphery of an insulating layer 67. Then, based on the usual dry etching method, the center section of the insulating layers 66 and 67 is removed, the front face of the breakdown voltage control layer 64 is exposed, and the acceptance section 65 is formed. And based on the usual vacuum deposition method, on the acceptance section 65 and an insulating layer 67, aluminum is made to deposit and the ohmic electrode layer 68 is formed. Then, based on the usual photolithography technique, a mask layer in a circle is formed on the surface field of the ohmic electrode layer 68 from the inside section of an insulating layer 67 to the periphery of the breakdown voltage control layer 64. Then, after removing the ohmic electrode layer 68 from on the center section of the breakdown voltage control layer 64 the periphery top of an insulating layer 67 based on the usual wet etching method, a mask layer is removed from on this fabricated ohmic electrode layer 68.

[0048] Next, actuation of this example is explained.

[0049] First, if a predetermined electrical potential difference is impressed from an external voltage source, while predetermined potential will generate to photoelectric cathode 40 and an electron lens 80, high potential generates by the electron lens 81 and the stem 50. Thereby, inside a vacuum housing 20, the electric field which pass each opening of electron lenses 80 and 81 from a semiconductor device 60, and go to photoelectric cathode 40 occur.

[0050] Moreover, while predetermined potential generates in the ohmic electrode layer 68, high potential generates with the semi-conductor substrate 61. Thereby, since the reverse bias electrical potential difference is impressed to the interior of a semiconductor device 60, the depletion layer prolonged toward the breakdown voltage control layer 64 from the plane of composition of the semi-conductor substrate 61 and the carrier multiplication layer 62 generates as an avalanche multiplication field.

[0051] Here, if an external feeble light, for example, the fluorescence generated from the living body minute amount matter, carries out incidence to the light sensing portion of an entrance window 30 as photon hnu, this photon hnu will penetrate the interior of an entrance window 30, and will be absorbed by photoelectric cathode 40. Therefore, the electron located in the valence band of photoelectric cathode 40 excites to a conduction band, and it is Photoelectron e by negative electron affinity operation. - It carries out and is emitted into a vacuum. Thus, photoelectron e emitted from photoelectric cathode 40 - It moves to the electric field opened toward photoelectric cathode 40 through the electron lens 80 from the stem 50 face to face, and incidence is carried out to the acceptance section 65 of a semiconductor device 60.

[0052] In addition, photoelectron e emitted from photoelectric cathode 40 with the electron lens 80 -

It is the aperture  $\phi$  2 of the acceptance section 65 to make it converge on one on the acceptance section 65, although it is theoretically impossible. It is possible to make it converge on extent. Therefore, each photoelectron e - Incidence will be carried out to the location where the acceptance sections 65 differ.

[0053] Photoelectron e which carried out incidence to the acceptance section 65 of a semiconductor device 60 - Whenever it loses energy about 3.6eV inside the carrier multiplication layer 62, the electronic-electron hole pair of a couple is generated. Therefore, single photoelectron e - By incidence, thousands of sets of electronic-electron hole pairs occur as a secondary carrier. Thus, the drift of the secondary carrier which carried out multiplication is countered and carried out to the electric field which go to the breakdown voltage control layer 64 from the semi-conductor substrate 61. In this, an electron arrives at the avalanche multiplication field generated inside the carrier multiplication layer 62. At this time, it is Photoelectron e. - The receiving electron irradiation gain is about  $4 \times 10^3$ . It reaches.

[0054] The electron which carried out the drift to the avalanche multiplication field repeats the avalanche multiplication process in which collide with the molecule which constitutes the carrier multiplication layer 62, and ionization is caused. Thus, the drift of the electron which carried out multiplication is countered and carried out to the electric field which go to the carrier multiplication layer 62 from the semi-conductor substrate 61, and it reaches the semi-conductor substrate 61. At this time, avalanche multiplication gain is about 30 and is Photoelectron e. - The total gain of the electron to receive is 105. Extent is reached.

[0055] Here, the carrier multiplication layer 62 of p mold is n+. By being grown epitaxially and formed on the semi-conductor substrate 61 of a mold, dopant distribution of the carrier multiplication layer 62 is dramatically controlled by homogeneity. Therefore, avalanche multiplication gain is reducing the dependence over the generating location of the secondary electron in an avalanche multiplication field, and has obtained good uniformity.

[0056] The reverse current corresponding to the amount of multiplication of such secondary electron is outputted to an external arithmetic unit through a wire 71 and the terminal rod 72 from the ohmic electrode layer 68. Therefore, based on actuation of an external arithmetic unit, the number of the photon which carried out incidence to the photomultiplier tube 10 is detected according to an individual one by one. therefore, the sensibility which reaches a quantum limitation in a feeble light which cannot be sensed with a naked eye -- a single photoelectron -- it is quantitatively measurable with counting.

[0057] Next, the photomultiplier tube of an example and the photomultiplier tube of the conventional example were made as an experiment, and comparative experiments were conducted.

[0058] The photomultiplier tube made as an experiment based on the example was constituted completely like the photomultiplier tube of the 1st example of the above. That is, in the semiconductor device, the carrier multiplication layer was formed with epitaxial growth, using Si as a semiconductor material. On the other hand, the photomultiplier tube made as an experiment as a conventional example was the usual photomultiplier tube which has the dynode of a 12-step configuration as an electron multiplier.

[0059] In addition, in the electron multiplier of the conventional example, the 1st step dynode was formed by GaP and the step [ 2nd ] - 12th step dynode was formed by Cu-Be. Therefore, especially the photomultiplier tube of the conventional example had the highest energy resolution which can be attained as a conventional technique by the component of the 1st step dynode.

[0060] By irradiating a near infrared ray to these photomultiplier tubes, energy resolution was measured, respectively. Here, the experiment conditions of the photomultiplier tube made as an experiment according to the example were as follows.

[0061]

Acceleration voltage to a photoelectron : -17kV, bias voltage:145V which were impressed to the semiconductor device, amplifier linked to a semiconductor device : Ortec Model 142A, the light source : LED (RED), ambient temperature : 25 degrees C

Moreover, the experiment conditions of the photomultiplier tube made as an experiment by the conventional example were as follows.

[0062]

Acceleration voltage to a photoelectron : Amplifier linked to -2.000kV and a semiconductor device : Canberra Model 2005, the light source : LED (RED), ambient temperature : 25 degrees C  
 The output pulse pulse-height distribution of the photomultiplier tube made as an experiment according to the example to drawing 3 are shown. The output pulse pulse-height distribution of the photomultiplier tube made as an experiment by the conventional example to drawing 4 are shown. In these graphs, an energy calibration is given to an axis of abscissa, it is Channel Number corresponding to an incident light child's amount of energy, and an axis of ordinate is Counts which detected the incident light child who has the amount of energy corresponding to each Channel Number.

[0063] consequently, in the conventional photomultiplier tube, it turns out in the photomultiplier tube of this invention that the energy resolution to a single photoelectron is resembling 14% markedly, and it is improving as compared with 30% - 100% of energy resolution to a single photoelectron. Moreover, also in the bottom of the conditions which considered the noise by the amplifier linked to a semiconductor device, the energy resolution to a single photoelectron hardly deteriorates theoretically. Therefore, the energy resolution to an incident light child can be substantially raised by attaining the uniformity of the gain in the carrier multiplication layer of a semiconductor device.

[0064] Here, in the conventional electron tube which contained PD as a semiconductor device, 4.3% of energy resolution to a single photoelectron is obtained under the ideal conditions which removed the noise by the amplifier linked to a semiconductor device. However, the total gain over a photoelectron is  $4 \times 10^3$ . Extent and since it is comparatively small, under the realistic conditions which considered the noise by amplifier, it will decrease to 40% - 70% of energy resolution to a single photoelectron.

[0065] Moreover, in conventional PMT (PhotomultiplierTube) which built in a multistage dynode and a multistage anode plate, the secondary electron multiplication factor by the dynode of the first rank is comparatively as small as 10. however, the secondary electron multiplication factor according to the breakdown voltage control layer 64 of the first rank with the photomultiplier tube of this invention --  $4 \times 10^3$  it is -- since -- it is large far rather than the secondary electron multiplication factor in conventional PMT. In addition, as compared with this conventional PMT, the improvement in the energy resolution in the photomultiplier tube of this invention originates in the secondary electron multiplication factor by the dynode of the first rank being large.

[0066] As compared with the photomultiplier tube of the 1st example of the above, 2nd example this example changes a part of semiconductor device, and is constituted.

[0067] As shown in drawing 5, the square pole-like semiconductor device 60 is constituted as APD almost like the 1st example of the above. However, unlike the 1st example of the above, the carrier multiplication layer 62 has about 30 micrometers of thickness, B is doped by concentration abbreviation  $10^{13}$ - $10^{15}$ cm<sup>-3</sup> as a p mold dopant, and it has specific resistance about ten to 1000 ohm-cm, and is formed. Moreover, the guard ring layer 63 has about 50 micrometers of the same thickness as the thickness of the carrier multiplication layer 62, and is formed.

[0068] Furthermore, unlike the 1st example of the above, the concave separation slot 69 in a circle has the depth which arrives at the front face of the semi-conductor substrate 61 in the center section of the guard ring layer 63, and is formed in it. The insulating layer 70 is deposited and formed in the whole front face of this separation slot 69.

[0069] This insulating layer 70 is the insulating thin film formed with the nitride of Si. The thickness of this insulating layer 70 is about 100nm. In case photoelectric cathode 40 is formed, in order not to degrade the semi-conductor property of the carrier multiplication layer 62, an insulating layer 70 is made to deposit on the front face of the carrier multiplication layer 62, and is formed.

[0070] In addition, APD which has such a separation slot is indicated by JP,57-10987,A at the detail, for example.

[0071] Next, the production process of this example is explained.

[0072] As the 2nd step following the 1st step in the production process of the 1st example of the above, a disc-like mask layer is formed on the center section of the insulating layer 66 based on the usual photolithography technique. Next, by using the KOH solution heated as an etching solution based on the usual wet etching method, the periphery of an insulating layer 66 and the guard ring

layer 63 is removed, the front face of the semi-conductor substrate 61 is exposed, and the separation slot 69 is formed. Then, based on the usual CVD method, on the whole surface of an insulating layer 66 and the separation slot 69, the nitride of Si is made to deposit and insulating layers 67 and 70 are formed.

[0073] As the 3rd step, a mask layer in a circle is formed on the periphery of an insulating layer 67 based on the usual photolithography technique. Then, based on the usual dry etching method, the center section of the insulating layers 66 and 67 is removed, the front face of the breakdown voltage control layer 64 is exposed, and the acceptance section 65 is formed. And based on the usual vacuum deposition method, on the acceptance section 65 and an insulating layer 67, aluminum is made to deposit and the ohmic electrode layer 68 is formed. Then, based on the usual photolithography technique, a mask layer in a circle is formed on the surface field of the ohmic electrode layer 68 from the inside section of an insulating layer 67 to the periphery of the breakdown voltage control layer 64. Then, after removing the ohmic electrode layer 68 from on the center section of the breakdown voltage control layer 64 the periphery top of an insulating layer 67 based on the usual wet etching method, a mask layer is removed from on this fabricated ohmic electrode layer 68.

[0074] Next, an operation of this example is explained.

[0075] This example acts almost like the photomultiplier tube of the 1st example of the above. However, in the semiconductor device 60, the thickness and specific resistance of the carrier multiplication layer 62 are greatly set up as compared with the above-mentioned example. Thereby, if a reverse bias electrical potential difference is impressed to the interior of a semiconductor device 60 based on actuation of an external voltage source, the depletion layer prolonged toward the breakdown voltage control layer 64 from the plane of composition of the semi-conductor substrate 61 and the carrier multiplication layer 62 will be formed by comparatively large thickness. Therefore, since the capacity of an avalanche multiplication field becomes small, working speed improves. therefore, a feeble light which cannot be sensed with a naked eye -- much more -- high sensitivity -- a single photoelectron -- it is quantitatively measurable with counting.

[0076] It is not restricted to many above-mentioned examples, and this invention can perform various deformation here.

[0077] Moreover, the acceptance section of a semiconductor device is exposed and formed in many above-mentioned examples. However, even if the acceptance section of a semiconductor device covers and forms the acceptance section by the insulating layer which consists of a nitride, when electrification by the exposure of a photoelectron is a minute amount, it is suitable.

[0078] Moreover, in many above-mentioned examples, Si is used as the base as a component of a semi-conductor substrate, a carrier multiplication layer, and a breakdown voltage control layer. However, as a component of semi-conductor layers various [ these ], it is also suitable to use InGaAs.

[0079] Furthermore, it sets in many above-mentioned examples, and is n+, respectively as a conductivity type of a semi-conductor substrate, a carrier multiplication layer, and a breakdown voltage control layer. A mold, p mold, and p+ The mold is set up. However, when germanium is used as the base as a component of semi-conductor layers various [ these ], it is p+, respectively as a conductivity type of a semi-conductor substrate, a carrier multiplication layer, and a breakdown voltage control layer. A mold, n mold, and n+ Even if it sets up a mold, the almost same operation effectiveness as the above-mentioned example is acquired.

[0080]

[Effect of the Invention] As explained to the detail above, if an external feeble light carries out incidence to the entrance window of an envelope as a photon in the photomultiplier tube of this invention, a photoelectron will be emitted from photoelectric cathode and incidence will be carried out to the acceptance section of a semiconductor device. The secondary carrier generated by energy disappearance of this photoelectron repeats and carries out multiplication of the process which generates an electronic-electron hole pair. Furthermore, while arrived at the avalanche multiplication field, and a carrier repeats and carries out multiplication of the avalanche multiplication process in which the component of a carrier multiplication layer is made to ionize.

[0081] Here, the dopant distribution is dramatically controlled by homogeneity by growing epitaxially and forming a carrier multiplication layer on the semi-conductor substrate which has a

different conductivity type from this. Therefore, avalanche multiplication gain reduced the dependence over the generation-of-carriers location in an avalanche multiplication field, and has obtained good uniformity.

[0082] Since the reverse current corresponding to the amount of multiplication of such a carrier is outputted from an ohmic electrode layer, the number of the photon which carried out incidence to the photomultiplier tube is detected according to an individual one by one. Therefore, by measurement by the conventional photomultiplier tube, it is extended to measuring an incident light child's number by measurement by the photomultiplier tube of this invention as compared with having been restricted to detecting an incident light child's existence. therefore, the sensibility which reaches a quantum limitation in a feeble light which cannot be sensed with a naked eye according to the photomultiplier tube of this invention -- a single photoelectron -- it is quantitatively measurable with counting.

---

[Translation done.]

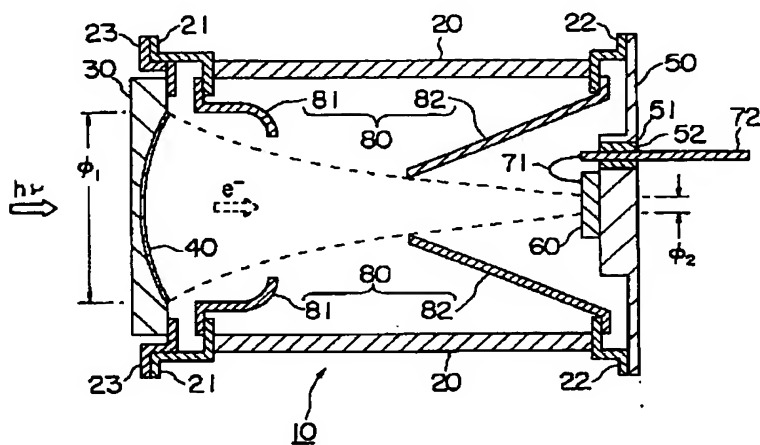
## \* NOTICES \*

JPO and NCIPI are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

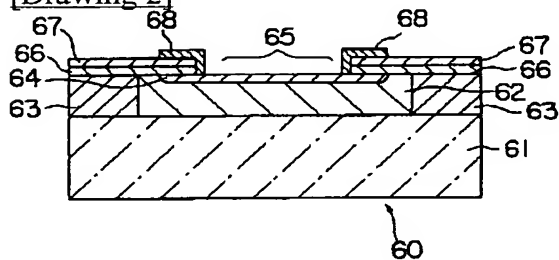
1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. \*\*\*\* shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

## DRAWINGS

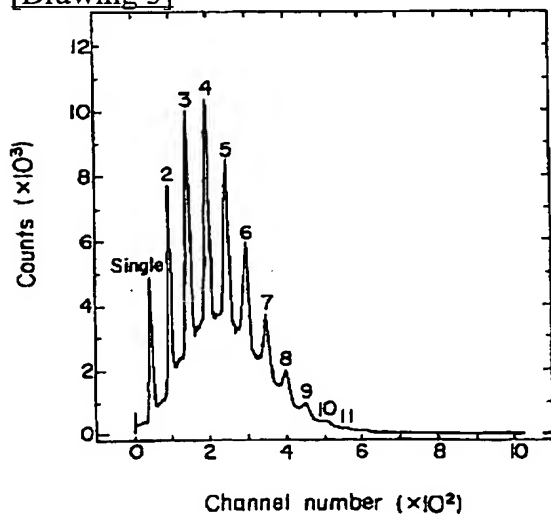
[Drawing 1]



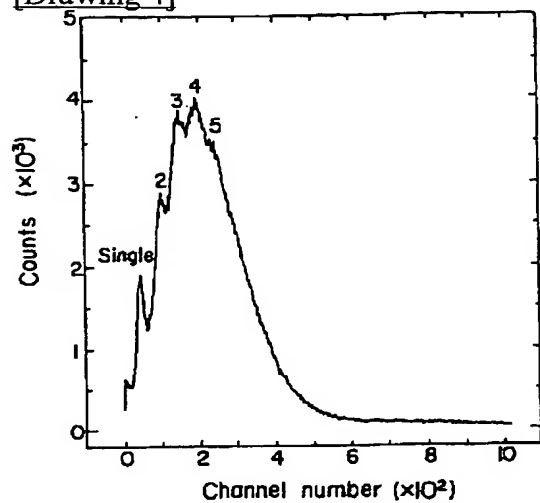
[Drawing 2]



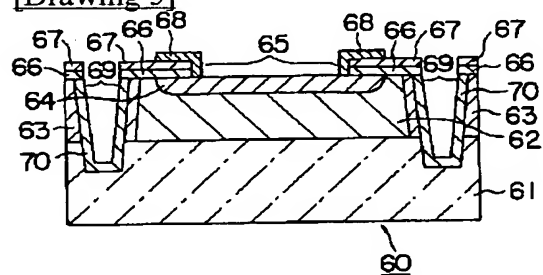
[Drawing 3]



[Drawing 4]



[Drawing 5]



---





[Translation done.]



# PHOTOMULTIPLIER

**Patent number:** JP8148113  
**Publication date:** 1996-06-07  
**Inventor:** SUYAMA MOTOHIRO; MURAMATSU MASA HARU;  
 OISHI MAKOTO; ISHIKAWA YOSHITAKA; YAMAMOTO  
 AKINAGA  
**Applicant:** HAMAMATSU PHOTONICS KK  
**Classification:**  
 - international: **H01J43/04; H01J43/12; H01J43/00; (IPC1-7):**  
 H01J43/12; H01L31/107  
 - european: H01J43/04; H01J43/12  
**Application number:** JP19940290070 19941124  
**Priority number(s):** JP19940290070 19941124

Also published as:

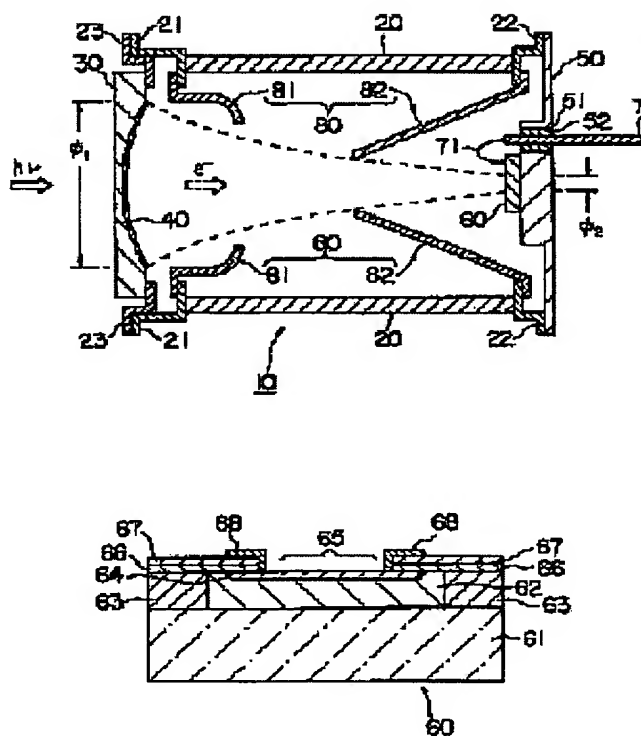
 EP0714117 (A)  
 US5654536 (A)  
 EP0714117 (A)  
 EP0714117 (B)

Report a data error he

## Abstract of JP8148113

**PURPOSE:** To largely improve energy resolution by disposing a carrier multiplication layer obtained by epitaxial growth and a breakdown voltage control layer of dopant concentration higher than the former on a semiconductor element opposite to a photocathode.

**CONSTITUTION:** A photocathode 40 for producing photoelectrons due to photons, a semiconductor element 66 for multiplying photoelectrons, opposite to it, and electron lenses 80 converging photoelectrons are disposed in a high-vacuum vessel comprising an enclosure 20, a light incident window 30 and a stem 50. In a photomultiplier tube 10, as above, a carrier multiplication layer 62 with dopant obtained by epitaxial growth being uniformly distributed is disposed on a semiconductor substrate 61 of a semiconductor element 60. A breakdown voltage control layer 64 of dopant concentration higher than the former is disposed on the layer. A photoelectron receiving portions 65 is partly exposed by means of an insulating layer 67 and an ohmic electrode layer 68. Accordingly, uniformity in avalanche multiplication gain for photoelectrons is attached and energy resolution is largely raised, so that high sensitive and quantitative measurement of faint light becomes possible.



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平8-148113

(43) 公開日 平成8年(1996)6月7日

(51) Int.Cl.<sup>4</sup>

識別記号

庁内整理番号

F I

技術表示箇所

H 0 1 J 43/12

H 0 1 L 31/107

H 0 1 L 31/ 10

B

審査請求 未請求 請求項の数3 O L (全 9 頁)

(21) 出願番号 特願平6-290070

(22) 出願日 平成6年(1994)11月24日

(71) 出願人 000236436

浜松ホトニクス株式会社

静岡県浜松市市野町1126番地の1

(72) 発明者 須山 本比呂

静岡県浜松市市野町1126番地の1 浜松ホ  
トニクス株式会社内

(72) 発明者 村松 雅治

静岡県浜松市市野町1126番地の1 浜松ホ  
トニクス株式会社内

(72) 発明者 大石 誠

静岡県浜松市市野町1126番地の1 浜松ホ  
トニクス株式会社内

(74) 代理人 弁理士 長谷川 芳樹 (外3名)

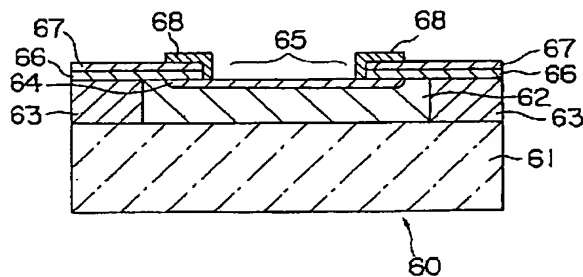
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光電子増倍管

(57) 【要約】

【目的】 光電子に対するアバランシェ増倍ゲインのユニフォミティを達成することにより、エネルギー分解能を大幅に向上させる。

【構成】 光電子増倍管は、高真空中に保持された外囲器の内部に、入射光によって励起した光電子を真空中に放出する光電陰極と、この光電陰極から放出された光電子を検出する半導体素子60とを備えている。この半導体素子60は、第1導電型の半導体基板61と、この半導体基板61上にエピタキシャル成長された第2導電型のキャリア増倍層62と、このキャリア増倍層62上に形成されてドーパント濃度が当該キャリア増倍層62よりも大きい第2導電型の降伏電圧制御層64と、この降伏電圧制御層64上に形成されることにより、当該降伏電圧制御層64の表面を光電子の受容部65として部分的に露出させるオーミック電極層68とから構成されている。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 内部を高真空中に保持する外囲器と、この外囲器の入射窓の真空側に形成され、入射光によって励起した光電子を真空中に放出する光電陰極と、

この光電陰極と対向して前記外囲器の内部に設置され、当該光電陰極から放出された前記光電子を検出する半導体素子とを備え、

前記半導体素子は、第1導電型の半導体基板と、

この半導体基板上にエピタキシャル成長して形成された第2導電型のキャリア増倍層と、

このキャリア増倍層上に形成されて当該キャリア増倍層のドーパント濃度よりも大きいドーパント濃度を有する第2導電型の降伏電圧制御層と、

この降伏電圧制御層上に形成されることにより、当該降伏電圧制御層の表面を前記光電子の受容部として部分的に露出させるオーミック電極層とから構成されていることを特徴とする光電子増倍管。

【請求項2】 前記光電陰極と前記半導体素子との間に設置され、当該光電陰極から放出された前記光電子を収束して当該半導体素子の前記受容部に導く電子レンズをさらに備え、前記受容部の口径は10mm以下であることを特徴とする請求項1記載の光電子増倍管。

【請求項3】 前記降伏電圧制御層の前記受容部として露出された表面の周辺は、窒化物からなる絶縁層により被覆されていることを特徴とする請求項1または請求項2記載の光電子増倍管。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、肉眼によって感知できない微弱な光を量子的限界に達する感度で検出する光電子増倍管であり、より詳細には、生体微量物質から発生する蛍光を単一光電子計数によって定量的に計測する光電子増倍管に関する。

## 【0002】

【従来の技術】従来の光電子増倍管には各種のものがあり、例えば、光電陰極から放出された光電子を増幅して検出する半導体素子として、アバランシェ・フォトダイオード(APD; Avalanche Photo Diode)を内蔵したものがあ

る。このようなAPD、特にバルク型のAPDは、拡散法やイオン注入法などによって半導体基板に形成された各種導電型領域から構成されている。

【0003】なお、このような光電子増倍管に関する先行技術は、

"United States Patent, No.5146296, Sep., 1992",

"LASER FOCUS WORLD, pp.125-132, Nov., 1993"

などに詳細に記載されている。

## 【0004】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上記従来の光電子増倍管においては、光電子に対するアバランシェ増倍ゲインがAPDにおける光電子の入射位置に大

きく依存して異なり、良好なユニフォミティを得ることができない。そのため、複数の光電子がAPDの受容部の異なる位置に入射した場合、エネルギー分解能が実用的に不十分であるという問題がある。

【0005】この問題を解決する方法の一つとして、光電子を収束してAPDの受容部に照射させる電子レンズが設置されている。しかしながら、この電子レンズによって光電陰極から放出された光電子をAPDの受容部上の一点に収束させることは、原理的に不可能である。そのため、個々の光電子はAPDの受容部の異なる位置に入射するので、やはり光電子に対するアバランシェ増倍ゲインの不均一性を十分に解消するに至っていない。

【0006】なお、このような電子レンズの設置に関しては、例えば特開平5-54849号公報に詳細に記載されている。

【0007】また、上記の問題を解決する方法の一つとして、光電陰極から放出された光電子を増幅して検出する半導体素子として、フォトダイオード(PD; Photo Diode)を内蔵することが行われている。このPDは、複数の個を平面的に配列した位置検出素子として構成されている。しかしながら、このようなPDはアバランシェ増倍ゲインを有しないので、トータルゲインが比較的小さくなっている。そのため、単一光電子を容易に検出することはできないという問題がある。

【0008】なお、このような光電子増倍管に関する先行技術は、

"Nuc1. Instr. and Meth., vol.A310, pp.261-266, 1991"

"Nuc1. Instr. and Meth., vol.A315, pp.375-384, 1992"

"Nuc1. Instr. and Meth., vol.A330, pp.93-99, 1993"

"HYBRID PHOTOMULTIPLIER TUBES, Delft Electronische Producten"

などに詳細に記載されている。

【0009】そこで、本発明は、以上の問題点を鑑みてなされたものであり、アバランシェ増倍層を有する半導体素子を内蔵した電子管において、光電子に対するアバランシェ増倍ゲインのユニフォミティを達成することにより、エネルギー分解能を大幅に向上させる光電子増倍管を提供することを目的とする。

## 【0010】

【課題を解決するための手段】本発明の光電子増倍管は、上記の目的を達成するために、内部を高真空中に保持する外囲器と、この外囲器の入射窓の真空側に形成され、入射光によって励起した光電子を真空中に放出する光電陰極と、この光電陰極と対向して外囲器の内部に設置され、当該光電陰極から放出された光電子を検出する半導体素子とを備えている。

【0011】ここで、半導体素子は、第1導電型の半導体基板と、この半導体基板上にエピタキシャル成長して

形成された第2導電型のキャリア増倍層と、このキャリア増倍層上に形成されて当該キャリア増倍層のドーパント濃度よりも大きいドーパント濃度を有する第2導電型の降伏電圧制御層と、この降伏電圧制御層上に形成されることにより、当該降伏電圧制御層の表面を光電子の受容部として部分的に露出させるオーミック電極層とから構成されていることを特徴とする。

【0012】なお、光電陰極と半導体素子との間に設置され、当該光電陰極から放出された光電子を収束して当該半導体素子の受容部に導く電子レンズをさらに備え、受容部の口径は10mm以下であることを特徴としてもよい。

【0013】また、降伏電圧制御層の受容部として露出された表面の周辺は、窒化物からなる絶縁層により被覆されていることを特徴としてもよい。

【0014】

【作用】本発明の光電子増倍管においては、外部電圧源から所定の電圧を印加すると、外囲器の内部には、半導体素子から光電陰極に向かう電界が発生する。また、半導体素子の内部には、逆バイアス電圧が印加されるので、半導体基板とキャリア増倍層との接合面から降伏電圧制御層に向かって延びた空乏層（アバランシェ増倍領域）が生成する。

【0015】ここで、外部の微弱な光が光子として外囲器の入射窓に入射すると、この光子は入射窓の内部を透過して光電陰極に吸収される。そのため、光電陰極の価電子帯に位置した電子が伝導帯に励起し、負の電子親和力作用によって光電子として真空中に放出される。このように光電陰極から放出された光電子は、半導体素子から光電陰極に向かう電界に対向して半導体素子の受容部に入射する。

【0016】半導体素子の受容部に入射した光電子は、キャリア増倍層の内部で所定のエネルギーを失う毎に一对の電子-正孔対を生成する。そのため、単一の光電子の入射によって、数千組の電子-正孔対が二次キャリアとして発生する。この過程における光電子に対するゲイン、すなわち電子照射ゲインは、光電子の入射エネルギーによって決定されているので、半導体素子の受容部における光電子の入射位置に対して良好なユニフォミティを有している。

【0017】この電子照射直後に増倍した二次キャリアは、キャリア増倍層から半導体基板または降伏電圧制御層に向かう電界に対向してドリフトする。この二次キャリアの一方のキャリアは、キャリア増倍層の内部に生成したアバランシェ増倍領域に到達する。このようにドリフトした一方のキャリアは、キャリア増倍層を構成する分子に衝突してイオン化を起こす過程、すなわちアバランシェ増倍を繰り返すので、さらに数十倍の電子-正孔対を生成する。このアバランシェ増倍した一方のキャリアは、キャリア増倍層から半導体基板または降伏電圧制

御層に向かう電界に対向してドリフトし、半導体基板または降伏電圧制御層に到達する。

【0018】ここで、キャリア増倍層はこれと異なる導電型を有する半導体基板上にエピタキシャル成長して形成されることにより、そのドーパント分布は非常に均一に制御されている。そのため、この過程における光電子に対するゲイン、すなわちアバランシェ増倍ゲインは、キャリア増倍層中におけるキャリアの発生位置に対する依存を低減しており、良好なユニフォミティを有している。

【0019】このようなキャリアの増倍量に対応した逆方向電流が、オーミック電極層から外部演算装置に出力される。そのため、外部演算装置の駆動に基づいて、光電子増倍管に入射した光子の個数を順次個別に検出する。したがって、肉眼によって感知できない微弱な光を、量子的限界に達する感度で単一光電子計数によって定量的に計測することができる。

【0020】

【実施例】以下、本発明の光電子増倍管に係る実施例の構成および作用について、図1ないし図5を参照して詳細に説明する。なお、図面の説明においては同一要素には同一符号を付し、重複する説明を省略する。また、図面の寸法比率は、説明のものと必ずしも一致していない。

【0021】第1実施例

図1に示すように、本実施例の光電子増倍管10は、中空円筒状の外囲器20の両端をそれぞれ入射窓30とステム50とによって気密に封止させ、圧力 $10^{-8}$ Torr程度の高真空中内部を保持して構成されている。この光電子増倍管10の内部には、電子レンズ80として2個のフォーカス電極81、82がそれぞれ光電陰極30及びステム50に近接して設置され、半導体素子60がステム50上に設置されている。

【0022】外囲器20は、中空円筒状のガラス製側管である。この外囲器20の両端には、2段に折り曲げられた中空円筒状の取付材21、22がそれぞれ設置されている。なお、これら取付材21、22は、それぞれコバルト金属で形成されている。

【0023】入射窓30は、円板状のガラス製面板であり、大気側及び真空側の各表面としてそれぞれ平面及び凹面を有している。この入射窓30の真空側周縁部には、2段に折り曲げられた中空円筒状の取付材23が設置されている。2個の取付材21、23の各端部を部分的に溶接することにより、外囲器20と入射窓30とは一体に構成されている。なお、入射窓30のガラス材料は、測定対象とする光の波長に対して透過性を有している。

【0024】ステム50は、円板状の金属製面板であり、真空側に半導体素子60の設置領域として凸部を有している。このステム50の真空側周縁部と取付材22

の端部とを部分的に溶接することにより、外囲器20とステム50とは一体に構成されている。また、ステム50の中央部付近には、半導体素子60の後述する端子棒72を挿通する貫通穴51が形成されている。なお、このステム50は、コパール金属で形成されている。

【0025】入射窓30の真空側表面には、薄膜状の光電陰極40が蒸着して形成されている。この光電陰極40は、外部電圧源（図示しない）から取付材23を介して所定の電圧を印加されており、例えば電位約-15kVに保持されている。なお、光電陰極40は、アルカリ金属、例えばK、Na、Cs、Sb等で形成されている。また、光電陰極40において、入射光h $\nu$ を受容して所定の量子効率で光電変換して光電子e $^{-}$ を生成する口径 $\phi_1$ は、約16mmである。

【0026】取付材21の端部には、一段折り曲げられて貫通した梳状のフォーカス電極81が部分的に溶接によって接合されている。このフォーカス電極81は、ステム50に対向して収束する姿勢で設置されている。フォーカス電極81は、外部電圧源（図示しない）から取付材21を介して光電陰極40の印加電圧と同一の電圧を印加され、例えば電位約-15kVに保持されている。なお、フォーカス電極81は、ステンレスから形成されている。

【0027】取付材22の端部には、一段折り曲げられて貫通した中空円錐台状のフォーカス電極82が部分的に溶接によって接合されている。このフォーカス電極82は、ステム50に対向して開放する姿勢で設置されている。フォーカス電極82は、外部電圧源（図示しない）から取付材22を介して所定の電圧を印加され、例えば電位約0Vに保持されている。なお、フォーカス電極82は、ステンレスから形成されている。

【0028】ステム50の真空側凸部上には、半導体素子60が後述する受容部65を光電陰極50に対向させて設置されている。この半導体素子60の後述する電極層66と、ステム50の貫通穴51を気密に挿通した金属製の端子棒72とは、金属製のワイヤー71の端部をそれぞれボンディングすることにより、電気的に接続されている。半導体素子60の表面側は、外部電圧源（図示しない）から端子棒72及びワイヤー71を介して所定の電圧を印加され、例えば電位約-145Vに保持されている。また、半導体素子60の裏面側は、外部電圧源（図示しない）からステム50を介して電子レンズ81の印加電圧と同一の電圧を印加され、例えば電位約0Vに保持されている。これにより、半導体素子60は全体として逆バイアス電圧を印加されている。

【0029】なお、端子棒72は、半導体素子60から出力した検出信号を処理する外部演算装置（図示しない）に接続されている。また、貫通穴51と端子棒72との間には、円筒状の絶縁材52が気密に封止して設置されている。さらに、半導体素子60において、光電子

e $^{-}$ を受容して所定の増倍率で有効に増幅する口径 $\phi_2$ は、約3mmである。

【0030】図2に示すように、四角柱状の半導体素子60は、APDとして構成されている。この半導体素子60は、光電陰極30から放出されて電子レンズ80によって収束された光電子e $^{-}$ を後述する受容部65に照射され、後述するアバランシェ増倍領域で増幅して検出する半導体検出器である。

【0031】平板状の半導体基板61の中央部上には、円板状のキャリア増倍層62が形成されている。この半導体基板61の周辺部上には、円環状のガードリング層63がキャリア増倍層62と同一の層厚を有して形成されている。キャリア増倍層62の表面中央領域には、円板状の降伏電圧制御層64が形成されている。

【0032】半導体基板61は、第1導電型すなわちn型のSiで形成された高濃度単結晶ウエハである。この半導体基板61は、層厚約500 $\mu$ mを有し、n型ドーパントとしてPを濃度約 $10^{19}$ cm $^{-3}$ でドーブされ、比抵抗約0.01 $\Omega$ ・cmを有している。

【0033】キャリア増倍層62は、第2導電型すなわちp型のSiを半導体基板61上にエピタキシャル成長して形成された低濃度半導体層である。このキャリア増倍層62は、層厚約10 $\mu$ mを有し、p型ドーパントとしてBを濃度約 $10^{14}$ ～ $10^{16}$ cm $^{-3}$ でドーブされ、比抵抗約1～100 $\Omega$ ・cmを有している。キャリア増倍層62のドーパント濃度は、降伏電圧に接近した電圧を印加したときに半導体基板61との接合面から拡がる空乏層が降伏電圧制御層64に到達する値である。

【0034】なお、このキャリア増倍層62において良好な結晶性を保持してエピタキシャル成長させる層厚dは、約5 $\mu$ m～約50 $\mu$ mの範囲に含まれるように設定することが好適である。もし、層厚dが約50 $\mu$ mよりも大きい場合、層厚方向のドーパント濃度の不均一性が顕著になるので、光電子e $^{-}$ に対するアバランシェ増倍ゲインのユニフォミティをキャリアの発生位置に依存して劣化させてしまう。一方、層厚dが約5 $\mu$ mよりも小さい場合、半導体基板61から伸びて拡がる空乏層が薄くなるので、光電子e $^{-}$ に対する電子照射ゲインを低減させてしまう。

【0035】ここで、層厚dを約10 $\mu$ mに設定した理由は、加速エネルギー約15keVで照射された光電子e $^{-}$ の最大飛程約3 $\mu$ mと、後述するアバランシェ増倍領域の層厚約3 $\mu$ mとに対して、光電子e $^{-}$ に対する電子照射ゲインの揺らぎを最低限に押さえるためにそれぞれ若干の余裕を考慮したからである。

【0036】ガードリング層63は、第1導電型のドーパントとしてn型ドーパントをキャリア増倍層62の周辺部に熱拡散して形成された高濃度半導体層である。このガードリング層63は、キャリア増倍層62の層厚と同一の層厚約10 $\mu$ mを有し、n型ドーパントとしてP

を半導体基板 61 の濃度と同一の濃度約  $1.0^{19} \text{ cm}^{-3}$  でドーピングされている。

【0037】降伏電圧制御層 64 は、第 2 導電型のドーパントとして p 型ドーパントをキャリア増倍層 62 の表面中央領域に熱拡散して形成された高濃度半導体層である。この降伏電圧制御層 64 は、層厚約  $1 \mu\text{m}$  を有し、p 型ドーパントとして B を半導体基板 61 の濃度と同一の濃度約  $1.0^{19} \text{ cm}^{-3}$  でドーピングされている。この降伏電圧制御層 64 の表面中央部には、円形状の受容部 65 が光電陰極 40 に対向して露出されている。

【0038】なお、この受容部 65 において、光電子  $e^-$  を受容して所定の増倍率で増幅する口径  $\phi_c$  は、約  $1.0 \text{ mm}$  以下の範囲に含まれるように設定することが好適である。もし、口径  $\phi_c$  が約  $1.0 \text{ mm}$  よりも大きい場合、表面方向のドーパント濃度の不均一性が顕著になるので、光電子  $e^-$  に対するアバランシェ増倍ゲインのユニフォームリティをキャリアの発生位置に依存して劣化させてしまう。また、アバランシェ増倍領域の容量が大きくなるので、動作速度が低減してしまう。

【0039】受容部 65 の周辺部に位置する降伏電圧制御層 64 の表面周縁部上の大部分と、ガードリング層 63 の表面全体上とは、2 種類の絶縁層 66、67 が順次積層して形成されている。絶縁層 66 は、Si の窒化物で形成された絶縁性薄膜である。この絶縁層 66 の層厚は約  $200 \text{ nm}$  である。絶縁層 67 は、Si の窒化物で形成された絶縁性薄膜である。この絶縁層 67 の層厚は約  $50 \text{ nm}$  である。

【0040】なお、絶縁層 66 は、ガードリング層 63 及び降伏電圧制御層 64 を形成する際にキャリア増倍層 62 の結晶性を良好に保持するために、あらかじめキャリア増倍層 62 の表面領域を酸化させて形成するものである。また、絶縁層 67 は、光電陰極 40 を形成する際にキャリア増倍層 62、ガードリング層 63 及び降伏電圧制御層 64 の半導体特性を劣化させないために、絶縁層 66 上に堆積させて形成するものである。

【0041】絶縁層 67 上には、円環状のオーミック電極層 68 が形成されており、絶縁層 66、67 の側壁に沿って降伏電圧制御層 64 の表面周縁部に接触している。このオーミック電極層 68 は、Al で形成された金属薄膜であり、降伏電圧制御層 64 に対して良好なオーミック接触性を有している。

【0042】なお、オーミック電極層 68 は、ワイヤー 71 のボンディングによって外部電圧源（図示しない）から端子棒 72 を介して所定の電圧を印加され、例えば  $-145 \text{ V}$  の負電位に保持されている。また、半導体基板 61 は、ステム 50 上の設置によって外部電圧源（図示しない）から所定の電圧を印加され、例えば  $0 \text{ V}$  のグラウンド (GND) 電位に保持されている。これにより、 $n^+$  型の半導体基板 61 と p 型の降伏電圧制御層 64 との間に、すなわちキャリア増倍層 62 に空乏層がアバ

ランシェ増倍領域として生成される。

【0043】ここで、受容部 65 に入射した光電子  $e^-$  がアバランシェ増倍領域に到達するまでの電子照射ゲインは、約  $4 \times 10^3$  である。これらのキャリアがアバランシェ増倍領域を通過して半導体基板 61 に到達するまでのアバランシェ増倍ゲインは、約 30 である。これにより、半導体素子 60 の全体として光電子  $e^-$  に対する二次電子のゲインは、 $10^5$  程度に達する。

【0044】なお、このような階段接合型の APD に近似した超階段接合型の APD に関しては、例えば特開昭 50-54290 号公報に詳細に記載されている。

【0045】次に、本実施例における半導体素子 60 の製造工程について説明する。

【0046】第 1 のステップとして、通常の CVD (Chemical Vapor Deposition) 法に基づいて、 $n^+$  型 Si からなる半導体基板 61 の全面上に p 型 Si をエピタキシャル成長させて p 型のキャリア増倍層 62 を形成する。次に、通常の熱酸化法に基づいて、キャリア増倍層 62 の表面領域を酸化させて Si の窒化物からなる絶縁層 66 を形成する。続いて、通常の熱拡散法に基づいて、絶縁層 66 の周辺部下方に位置するキャリア増倍層 62 に n 型ドーパントとして P を選択的に拡散させて  $n^+$  型のガードリング層 63 を形成する。さらに、通常の熱拡散法に基づいて、絶縁層 66 の中央部下方に位置するキャリア増倍層 62 に p 型ドーパントとして B を選択的に拡散させて p 型の降伏電圧制御層 64 を形成する。

【0047】第 2 のステップとして、通常の CVD 法に基づいて、絶縁層 66 の全面上に Si の窒化物を堆積させて絶縁層 67 を形成する。次に、通常のフォトリソグラフィ技術に基づいて、絶縁層 67 の周辺部上に円環状のマスク層を形成する。続いて、通常のドライエッチング法に基づいて、絶縁層 66、67 の中央部を除去して降伏電圧制御層 64 の表面を露出させて受容部 65 を形成する。そして、通常の真空蒸着法に基づいて、受容部 65 及び絶縁層 67 上に Al を堆積させてオーミック電極層 68 を形成する。この後、通常のフォトリソグラフィ技術に基づいて、絶縁層 67 の内側部から降伏電圧制御層 64 の周辺部に至るオーミック電極層 68 の表面領域上に円環状のマスク層を形成する。続いて、通常のウェットエッチング法に基づいて、絶縁層 67 の周辺部上と降伏電圧制御層 64 の中央部上とからオーミック電極層 68 を除去した後、この成形されたオーミック電極層 68 上からマスク層を除去する。

【0048】次に、本実施例の動作について説明する。

【0049】まず、外部電圧源から所定の電圧を印加すると、光電陰極 40 及び電子レンズ 80 に所定電位が生成するとともに、電子レンズ 81 及びステム 50 により高い電位が生成する。これにより、真空容器 20 の内部には、半導体素子 60 から電子レンズ 80、81 の各開

口を通過して光電陰極40に向かう電界が発生する。

【0050】また、オーミック電極層68に所定電位が生成するとともに、半導体基板61により高い電位が生成する。これにより、半導体素子60の内部には、逆バイアス電圧が印加されているので、半導体基板61とキャリア増倍層62との接合面から降伏電圧制御層64に向かって延びた空乏層がアバランシェ増倍領域として生成する。

【0051】ここで、外部の微弱な光、例えば生体微量物質から発生した蛍光が光子 $h\nu$ として入射窓30の受光部に入射すると、この光子 $h\nu$ は入射窓30の内部を透過して光電陰極40に吸収される。そのため、光電陰極40の価電子帯に位置した電子が伝導帯に励起し、負の電子親和力作用によって光電子 $e^-$ として真空中に放出される。このように光電陰極40から放出された光電子 $e^-$ は、ステム50から電子レンズ80を介して光電陰極40に向かって開放した電界に対向して移動し、半導体素子60の受容部65に入射する。

【0052】なお、電子レンズ80によって光電陰極40から放出された光電子 $e^-$ を受容部65上の一点に収束させることは原理的に不可能であるが、受容部65の口径 $\phi$ 、程度に収束させることは可能である。そのため、個々の光電子 $e^-$ は受容部65の異なる位置に入射することになる。

【0053】半導体素子60の受容部65に入射した光電子 $e^-$ は、キャリア増倍層62の内部でエネルギー約3.6eVを失う毎に一对の電子-正孔対を生成する。そのため、単一の光電子 $e^-$ の入射によって、数千組の電子-正孔対が二次キャリアとして発生する。このように増倍した二次キャリアは、半導体基板61から降伏電圧制御層64に向かう電界に対向してドリフトする。この中で電子は、キャリア増倍層62の内部に生成したアバランシェ増倍領域に到達する。このとき、光電子 $e^-$ に対する電子照射ゲインは約 $4 \times 10^3$ に達する。

【0054】アバランシェ増倍領域にドリフトした電子は、キャリア増倍層62を構成する分子に衝突してイオン化を起こすアバランシェ増倍過程を繰り返す。このように増倍した電子は、半導体基板61からキャリア増倍層62に向かう電界に対向してドリフトして半導体基板61に到達する。このとき、アバランシェ増倍ゲインは約30であり、光電子 $e^-$ に対する電子のトータルゲインは $10^5$ 程度に達する。

【0055】ここで、p型のキャリア増倍層62はn型の半導体基板61上にエピタキシャル成長して形成されることにより、キャリア増倍層62のドーパント分布は非常に均一に制御されている。そのため、アバランシェ増倍ゲインは、アバランシェ増倍領域中における二次電子の発生位置に対する依存を低減しており、良好なユニフォミティを得ている。

【0056】このような二次電子の増倍量に対応した逆

方向電流が、オーミック電極層68からワイヤー71及び端子棒72を介して外部演算装置に出力される。そのため、外部演算装置の駆動に基づいて、光電子増倍管10に入射した光子の個数を順次個別に検出する。したがって、肉眼によって感知できない微弱な光を、量子的限界に達する感度で単一光電子計数によって定量的に計測することができる。

【0057】次に、実施例の光電子増倍管と従来例の光電子増倍管とを試作し、比較実験を行った。

10 【0058】実施例に基づいて試作した光電子増倍管は、上記第1実施例の光電子増倍管と全く同様に構成した。すなわち、半導体素子において、半導体材料としてSiを用い、エピタキシャル成長によってキャリア増倍層を形成した。一方、従来例として試作した光電子増倍管は、電子増倍部として12段構成のダイノードを有する通常の光電子増倍管であった。

【0059】なお、従来例の電子増倍部においては、第1段ダイノードはGaPで形成され、第2段～第12段ダイノードはCu-Beで形成されていた。そのため、従来例の光電子増倍管は、特に第1段ダイノードの構成材料によって、従来技術として達成可能な最高のエネルギー分解能を有していた。

【0060】これらの光電子増倍管に対して近赤外線を照射することにより、それぞれエネルギー分解能を計測した。ここで、実施例により試作した光電子増倍管の実験条件は次の通りであった。

【0061】

光電子に対する加速電圧 : -17 kV,  
半導体素子に印加したバイアス電圧 : 145 V,  
半導体素子に接続した増幅器 : Ortec Model 142 A,  
光源 : LED(RED),  
雰囲気温度 : 25 °C.

また、従来例により試作した光電子増倍管の実験条件は次の通りであった。

【0062】

光電子に対する加速電圧 : -2.000 kV,  
半導体素子に接続した増幅器 : Canberra Model 2005,  
光源 : LED(RED),  
雰囲気温度 : 25 °C.

図3に、実施例により試作した光電子増倍管の出力パルス波高分布を示す。図4に、従来例により試作した光電子増倍管の出力パルス波高分布を示す。これらのグラフにおいては、横軸はエネルギー較正を施されて入射光子のエネルギー量に対応したChannel Numberであり、縦軸は各Channel Numberに対応したエネルギー量を有する入射光子を検出したCountsである。

50 【0063】この結果、従来の光電子増倍管において単



一光電子に対するエネルギー分解能30%~100%に比較すると、本発明の光電子増倍管において単一光電子に対するエネルギー分解能は14%と格段に向上していることがわかる。また、半導体素子に接続した増幅器によるノイズを加味した条件の下においても、単一光電子に対するエネルギー分解能は理論上ほとんど劣化しない。したがって、半導体素子のキャリア増倍層におけるゲインのユニフォミティを達成することにより、入射光子に対するエネルギー分解能を大幅に向上させることができる。

【0064】ここで、半導体素子としてPDを内蔵した従来の電子管では、半導体素子に接続した増幅器によるノイズを除去した理想的条件の下に、単一光電子に対するエネルギー分解能4.3%が得られる。しかしながら、光電子に対するトータルゲインが $4 \times 10^3$ 程度と比較的小さいために、増幅器によるノイズを加味した現実的条件の下には、単一光電子に対するエネルギー分解能40%~70%に低減してしまう。

【0065】また、多段のダイノードと陽極とを内蔵した従来のPMT (Photomultiplier Tube) では、初段のダイノードによる二次電子増倍率が10と比較的小さい。しかしながら、本発明の光電子増倍管では、初段の降伏電圧制御層64による二次電子増倍率は $4 \times 10^3$ であるので、従来のPMTにおける二次電子増倍率よりもはるかに大きくなっている。なお、この従来のPMTと比較すると、本発明の光電子増倍管におけるエネルギー分解能の向上は、初段のダイノードによる二次電子増倍率が大きいことに起因している。

#### 【0066】第2実施例

本実施例は、上記第1実施例の光電子増倍管と比較し、半導体素子の一部のみを異ならせて構成したものである。

【0067】図5に示すように、四角柱状の半導体素子60は、上記第1実施例とほぼ同様にしてAPDとして構成されている。ただし、上記第1実施例と異なり、キャリア増倍層62は、層厚約 $30 \mu\text{m}$ を有し、p型ドープメントとしてBを濃度約 $10^{13} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ でドープされ、比抵抗約 $10 \sim 1000 \Omega \cdot \text{cm}$ を有して形成されている。また、ガードリング層63は、キャリア増倍層62の層厚と同一の層厚約 $50 \mu\text{m}$ を有して形成されている。

【0068】さらに、ガードリング層63の中央部には、上記第1実施例と異なり、円環状凹型の分離溝69が半導体基板61の表面に達する深さを有して形成されている。この分離溝69の表面全体には、絶縁層70が堆積して形成されている。

【0069】この絶縁層70は、Siの窒化物で形成された絶縁性薄膜である。この絶縁層70の層厚は約100nmである。絶縁層70は、光電陰極40を形成する際にキャリア増倍層62の半導体特性を劣化させないた

めに、キャリア増倍層62の表面上に堆積させて形成するものである。

【0070】なお、このような分離溝を有するAPDに関しては、例えば特開昭57-10987号公報に詳細に記載されている。

【0071】次に、本実施例の製造工程について説明する。

【0072】上記第1実施例の製造工程における第1のステップに続く第2のステップとして、通常のフォトリソグラフィ技術に基づいて、絶縁層66の中央部に円板状のマスク層を形成する。次に、通常のウェットエッチング法に基づいて、エッチング溶液として加熱したKOH溶液を用いることにより、絶縁層66及びガードリング層63の周辺部を除去して半導体基板61の表面を露出させ、分離溝69を形成する。続いて、通常のCVD法に基づいて、絶縁層66及び分離溝69の全面上にSiの窒化物を堆積させて絶縁層67、70を形成する。

【0073】第3のステップとして、通常のフォトリソグラフィ技術に基づいて、絶縁層67の周辺部に円環状のマスク層を形成する。続いて、通常のドライエッチング法に基づいて、絶縁層66、67の中央部を除去して降伏電圧制御層64の表面を露出させて受容部65を形成する。そして、通常の真空蒸着法に基づいて、受容部65及び絶縁層67上にA1を堆積させてオーミック電極層68を形成する。この後、通常のフォトリソグラフィ技術に基づいて、絶縁層67の内側部から降伏電圧制御層64の周辺部に至るオーミック電極層68の表面領域上に円環状のマスク層を形成する。続いて、通常のウェットエッチング法に基づいて、絶縁層67の周辺部上と降伏電圧制御層64の中央部上とからオーミック電極層68を除去した後、この成形されたオーミック電極層68上からマスク層を除去する。

【0074】次に、本実施例の作用について説明する。

【0075】本実施例は、上記第1実施例の光電子増倍管とほぼ同様に作用する。ただし、半導体素子60においてキャリア増倍層62の層厚及び比抵抗は、上記実施例と比較して大きく設定されている。これにより、外部電圧源の駆動に基づいて、半導体素子60の内部に逆バイアス電圧が印加されると、半導体基板61とキャリア増倍層62との接合面から降伏電圧制御層64に向かって延びる空乏層が比較的大きな層厚で形成される。そのため、アバランシェ増倍領域の容量が小さくなるので、動作速度が向上する。したがって、肉眼によって感知できない微弱な光を、いっそう高感度で単一光電子計数によって定量的に計測することができる。

【0076】ここで、本発明は上記諸実施例に限られるものではなく、種々の変形を行うことが可能である。

【0077】また、上記諸実施例においては、半導体素子の受容部は露出して形成されている。しかしながら、

半導体素子の受容部は窒化物からなる絶縁層によって受容部を被覆して形成しても、光電子の照射による帯電が微量である場合には好適である。

【0078】また、上記諸実施例においては、半導体基板、キャリア増倍層及び降伏電圧制御層の構成材料として、Siをベースとして用いている。しかしながら、これら各種半導体層の構成材料としては、InGaAsを用いることも好適である。

【0079】さらに、上記諸実施例においては、半導体基板、キャリア増倍層及び降伏電圧制御層の導電型として、それぞれn<sup>+</sup>型、p型及びp<sup>+</sup>型を設定している。しかしながら、これら各種半導体層の構成材料としてGeをベースとして用いた場合、半導体基板、キャリア増倍層及び降伏電圧制御層の導電型として、それぞれp<sup>+</sup>型、n型及びn<sup>+</sup>型を設定しても、上記実施例とほぼ同様な作用効果が得られる。

【0080】

【発明の効果】以上詳細に説明したように、本発明の光電子増倍管においては、外部の微弱な光が光子として外囲器の入射窓に入射すると、光電陰極から光電子が放出されて半導体素子の受容部に入射する。この光電子のエネルギー消失によって生成された二次キャリアは、電子-正孔対を生成する過程を繰り返して増倍する。さらに、アバランシェ増倍領域に到達した一方のキャリアは、キャリア増倍層の構成分子をイオン化させるアバランシェ増倍過程を繰り返して増倍する。

【0081】ここで、キャリア増倍層はこれと異なる導電型を有する半導体基板上にエピタキシャル成長して形成されることにより、そのドーパント分布は非常に均一に制御されている。そのため、アバランシェ増倍ゲイン\*30

\*は、アバランシェ増倍領域中におけるキャリアの発生位置に対する依存を低減し、良好なユニフォミティを得ている。

【0082】このようなキャリアの増倍量に対応した逆方向電流がオーミック電極層から出力されるので、光電子増倍管に入射した光子の個数は順次個別に検出される。そのため、従来の光電子増倍管による計測では、入射光子の有無を検出することに制限されていたことに比較し、本発明の光電子増倍管による計測では、入射光子の個数を測定することに拡張されている。したがって、本発明の光電子増倍管によれば、肉眼によって感知できない微弱な光を、量子的限界に達する感度で単一光電子計数によって定量的に計測することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の光電子増倍管に係る第1実施例の構造を示す断面図である。

【図2】図1の光電子増倍管における半導体素子の構造を示す断面図である。

【図3】第1実施例に基づいて試作した光電子増倍管における出力パルス波高計測の結果を示すグラフである。

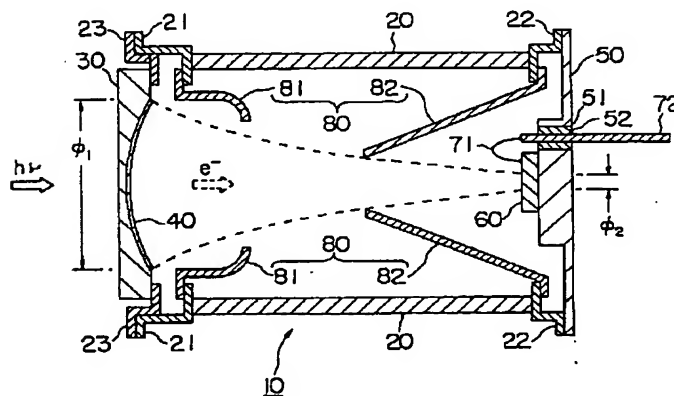
【図4】従来例として試作した光電子増倍管における出力パルス波高計測の結果を示すグラフである。

【図5】本発明の光電子増倍管に係る第2実施例における半導体素子の構造を示す断面図である。

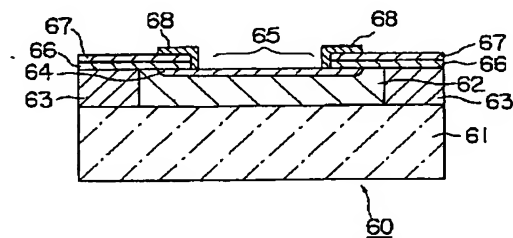
【符号の説明】

10…光電子増倍管、20…外囲器、30…入射窓、40…光電陰極、50…ステム、60…半導体素子、61…半導体基板、62…キャリア増倍層、64…降伏電圧制御層、65…受容部、67…絶縁層、68…オーミック電極層、69…分離溝、80…電子レンズ。

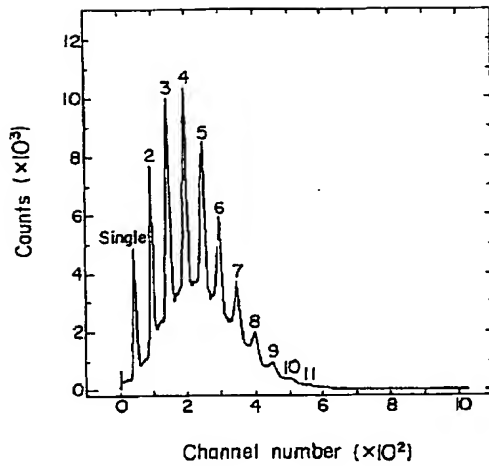
【図1】



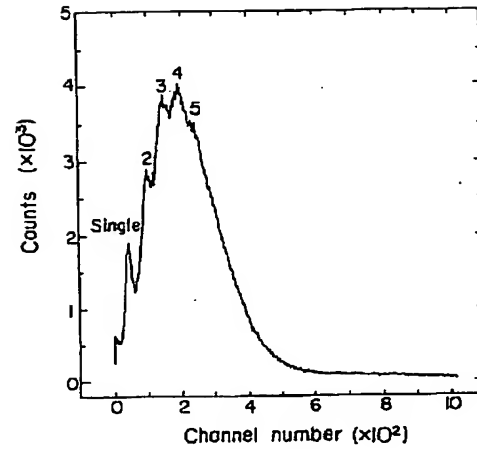
【図2】



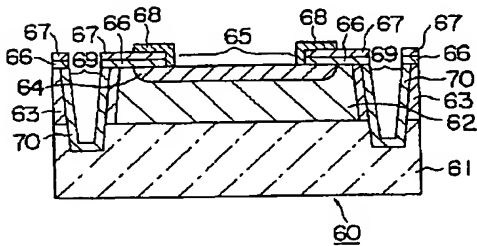
【図 3】



【図 4】



【図 5】



フロントページの続き

(72)発明者 石川 嘉隆  
静岡県浜松市市野町1126番地の1 浜松ホ  
トニクス株式会社内

(72)発明者 山本 晃永  
静岡県浜松市市野町1126番地の1 浜松ホ  
トニクス株式会社内

【公報種別】特許法第 1 7 条の 2 の規定による補正の掲載  
 【部門区分】第 7 部門第 1 区分  
 【発行日】平成 1 4 年 1 月 1 8 日 ( 2 0 0 2 . 1 . 1 8 )

【公開番号】特開平 8 - 1 4 8 1 1 3  
 【公開日】平成 8 年 6 月 7 日 ( 1 9 9 6 . 6 . 7 )  
 【年通号数】公開特許公報 8 - 1 4 8 2  
 【出願番号】特願平 6 - 2 9 0 0 7 0  
 【国際特許分類第 7 版】

H01J 43/12  
 H01L 31/107

【 F I 】

H01J 43/12  
 H01L 31/10 B

【手続補正書】  
 【提出日】平成 1 3 年 7 月 3 0 日 ( 2 0 0 1 . 7 . 3 0 )

【手続補正 1】  
 【補正対象書類名】明細書  
 【補正対象項目名】特許請求の範囲  
 【補正方法】変更  
 【補正内容】

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 内部を高真空中に保持する外囲器と、この外囲器の入射窓の真空側に形成され、入射光によって励起した光電子を真空中に放出する光電陰極と、この光電陰極と対向して前記外囲器の内部に設置され、当該光電陰極から放出された前記光電子を検出する半導体素子とを備え、前記半導体素子は、第 1 導電型の半導体基板と、この半導体基板上にエピタキシャル成長して形成された第 2 導電型のキャリア増倍層と、このキャリア増倍層上に形成されて当該キャリア増倍層のドーパント濃度よりも大きいドーパント濃度を有する第 2 導電型の降伏電圧制御層と、この降伏電圧制御層上に形成され当該降伏電圧制御層の一部表面を覆うオーミック電極層と、から構成され、当該降伏電圧制御層の表面のうち前記オーミック電極層に覆われていない部分の一部分は、真空中に放出された前記光電子を受容する受容部であり、前記受容部を囲む周辺部は、窒化物からなる絶縁層により被覆されている、ことを特徴とする光電子増倍管。

【請求項 2】 前記光電陰極と前記半導体素子との間に設置され、当該光電陰極から放出された前記光電子を収束して当該半導体素子の前記受容部に導く電子レンズをさらに備え、前記受容部の口径は 1 0 m m 以下であるこ

とを特徴とする請求項 1 記載の光電子増倍管。

【手続補正 2】  
 【補正対象書類名】明細書  
 【補正対象項目名】 0 0 1 1  
 【補正方法】変更  
 【補正内容】

【 0 0 1 1 】ここで、半導体素子は、第 1 導電型の半導体基板と、この半導体基板上にエピタキシャル成長して形成された第 2 導電型のキャリア増倍層と、このキャリア増倍層上に形成されて当該キャリア増倍層のドーパント濃度よりも大きいドーパント濃度を有する第 2 導電型の降伏電圧制御層と、この降伏電圧制御層上に形成され当該降伏電圧制御層の一部表面を覆うオーミック電極層と、から構成され、当該降伏電圧制御層の表面のうち前記オーミック電極層に覆われていない部分の一部分は、真空中に放出された前記光電子を受容する受容部であり、前記受容部を囲む周辺部は、窒化物からなる絶縁層により被覆されている、ことを特徴とする。

【手続補正 3】  
 【補正対象書類名】明細書  
 【補正対象項目名】 0 0 1 3  
 【補正方法】削除  
 【手続補正 4】

【補正対象書類名】明細書  
 【補正対象項目名】 0 0 1 9  
 【補正方法】変更  
 【補正内容】

【 0 0 1 9 】このようなキャリアの増倍量に対応した逆方向電流が、オーミック電極層から外部演算装置に出力される。そのため、外部演算装置の駆動に基づいて、光電子増倍管に入射した光子の個数を順次個別に検出する。したがって、肉眼によって感知できない微弱な光を、量子的限界に達する感度で単一光電子計数によって定量的に計測することができる。さらに、降伏電圧制御